

コンピュータにおけるシミュレーション技術

Simulation Technologies in Computing Systems

近年のハードウェアとソフトウェア両面での技術の進歩、及びユーザーニーズの多様化によって、コンピュータは全体として複雑化した。これに伴い、コンピュータの設計や運用の支援手段として、シミュレーション技術の有用性が再認識され、種々の目的で使用されている。

ここでは、コンピュータでのシミュレーション技術の代表例である、論理装置の論理シミュレーション、分散処理システム向き性能評価シミュレータ及び運用自動化のためのオペレータと端末のシミュレーションを取り上げ、シミュレーションの技術課題であるモデルの構築と検証及び入力データの準備の容易化にはデータベースが、計算時間の短縮には対象システムの階層分割形のモデル化が、それぞれ有効であることを実例を通して示す。

大町一彦* Kazuhiko Ômachi
大野泰廣** Yasuhiro Ôno
三善正之** Masayuki Miyoshi
久保隆重* Takashige Kubo
本山博司* Hiroshi Motoyama

1 緒言

LSIの高集積化、ソフトウェア開発量の増大、コンピュータシステムの分散化などに見られるように、近年のコンピュータシステムは全体として大規模化し複雑化している。これに伴い、コンピュータシステムの設計も困難化している。すなわち、複雑なコンピュータシステムに対して、機能、性能、信頼性、保守性などの尺度から成る総合経済性が目標どおり達成できるか否かを、設計段階で評価して確かめ、問題点があれば、直ちにその対策を設計にフィードバックさせねばならないということから生じる難しさである。

コンピュータでのシミュレーション技術は、この設計段階での各種尺度の評価のための有効な手段として用いられている。

本論文は、以下2章でシミュレーション技術の使用目的と技術課題を示し、3章から5章で、代表例の概要、適用効果及び技術課題の取組み方を中心に論じ、コンピュータでのシミュレーション技術の現状について述べる。

2 シミュレーション技術の使用目的と技術課題

コンピュータでのシミュレーション技術の主な使用目的は、設計段階での性能あるいは機能などの評価である。評価対象となるコンピュータシステムそのものを用いることができれば、シミュレーションを用いるよりも有利である場合が多い。しかし、下記の場合には評価対象システムそのものを用いることはできず、シミュレーションに頼らざるを得ない。

(1) 対象システムが存在しない場合

3章に記載する新しい論理装置の設計段階のような場合には、対象システムをまだ実際に動作させることはできない。

(2) 対象システムの実現が困難な場合

大規模な分散処理システムのように、構成要素が多くそれらの組合せも複雑であると、早い時期にすべての構成要素を集めて、システムを構成することは極めて難しい^{1),2)}。分散処理システム向き性能評価シミュレータについては4章に記載する。

(3) 動作環境の設定が困難な場合

限界条件下での動作テスト、破壊試験などでの動作環境の設定、あるいは、数多くの端末装置からのデータ入力の実現は、実際のシステムでは極めて難しい。多端末からのデータ

入力のシミュレーションについては5章に記載する。

(4) 数多くの動作環境の設定が必要な場合

個々の動作環境の設定は容易であってもその数が多くなると、対象システムそのものを用いることは実際的でなくなる。この例は、大容量記憶システムMSS³⁾(Mass Storage System)のシミュレータあるいはHITAC Mシリーズ用オペレーティングシステムであるVOS 3(Virtual storage Operating System 3)の性能評価シミュレータ⁴⁾に見られる。

コンピュータでのシミュレーションは、上記の各場合のように、実際的な意味で実現が不可能である評価を可能とする働きをもっている。

一方、マイクロコンピュータのソフトウェアを開発する場合には、汎用大形コンピュータによるマイクロコンピュータのシミュレーションを用いることがある⁵⁾。このシミュレーションの目的は、やはり設計段階でのソフトウェアの機能評価であるが、上記の四つの場合とは異なる。すなわち、これは既に完備している汎用大形コンピュータのソフトウェア開発支援機能を利用するために、汎用大形コンピュータによるマイクロコンピュータのシミュレータを開発して利用するコストと、開発中のマイクロコンピュータに、更に汎用大形コンピュータ並みのソフトウェア開発支援機能を開発して利用するコストとの比較によって、より経済的な前者が選択された場合である。

設計段階での評価という使用目的のほかに、コンピュータシステムの運用の自動化、省力化を目的としたシミュレーション技術がある。これには人手による操作を、プログラムで置き換えたキーインアウトシミュレーション及び1台のコンピュータシステム上に複数のコンピュータシステムを仮想的に実現させ、同時に複数のオペレーティングシステムを稼働させる仮想計算機システム⁶⁾がある。キーインアウトシミュレーションについては、5章に記載する。

シミュレーションをその対象別に分類すると、ハードウェアに始まってソフトウェア及び運用形態まで含めたコンピュータシステムに至るまで、広い範囲にわたっている。

表1に、対象及び使用目的をそれぞれ縦軸、横軸にして、

* 日立製作所システム開発研究所 ** 日立製作所神奈川工場

表1 コンピュータでのシミュレーション技術例 コンピュータでのシミュレーション技術は、対象と使用目的に応じて広く使用されている。

使用目的 対象	性能評価	機能評価	運用自動化,省力化
ハードウェア	<ul style="list-style-type: none"> ●大容量記憶システムMSS³⁾の性能シミュレーション ●通信網トラヒックシミュレータ¹⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> ●論理装置の論理シミュレーション ●入出力障害発生器²⁾ 	●仮想計算機システム VMS ⁶⁾
ソフトウェア	<ul style="list-style-type: none"> ●分散処理システム向き性能評価シミュレータ ISCP/A-D ●オペレーティングシステム VOS3 用性能評価シミュレータ PRIME 3⁴⁾ 	●テスト支援システム HITS ⁵⁾	
コンピュータシステム	<ul style="list-style-type: none"> ●システムシミュレーションテスタ SST²⁾ ●多端末シミュレータ CIOS ●ベンチマークジョブ 	同左	

注：略語説明ほか

MSS(Mass Storage System), ISCP/A-D(Integrated Tools for System Configuration Planning/Analysis-Distributed Computing System Model) VOS 3 (Virtual storage Operating System 3), PRIME 3 (Performance Review Model for VOS 3), SST(System Simulation Tester), CIOS(Communication Input Output Simulation), HITS(Highly Interactive Testing and debugging System), VMS(Virtual Machine System) 下線は、本論文で取り上げる技術であることを示す。

先に挙げたコンピュータでのシミュレーション技術の数例を示した。

コンピュータでのシミュレーションの技術的な課題には、シミュレーションモデルの構築と検証の容易化、シミュレーションの実行用入力データの準備の容易化及びシミュレーションの実行に要する計算時間の短縮がある。

3 論理装置の論理シミュレーション

3.1 論理シミュレーションの目的

近年、半導体技術の進歩により、コンピュータなどの論理装置にはLSIやVLSIが使用され、飛躍的な高性能化・小形化を実現している。しかし、このLSI上にいわゆる論理不良と呼ばれる設計誤りがあると、LSI上での手直しは困難なため製作し直さなければならず、設計誤りをLSI製作前に取り除いておくことが従来以上に極めて重要になってきている。

論理シミュレーションは、既存のコンピュータの中に、新しく設計した論理装置のモデルを構築し、意図したとおり正しく動作するか否かを模擬検証するための手段であり、論理装置の設計に欠かすことのできない重要な設計手法の一つである。

3.2 論理設計支援システム⁷⁾

論理装置の論理設計は、実現すべき機能をANDゲート、ORゲートなどの基本論理素子を用いて論理回路図に具現化することと、それが意図したとおりに動作することを確認・検証することである。この設計作業は、図1に示すような論理設計支援システムを用いて進められる。

まず、設計者が作成した論理回路図は、直接TSS(タイムシェアリングシステム)端末から論理入力システムを通じて設計データベース上に格納され、その内容は、論理図機械書

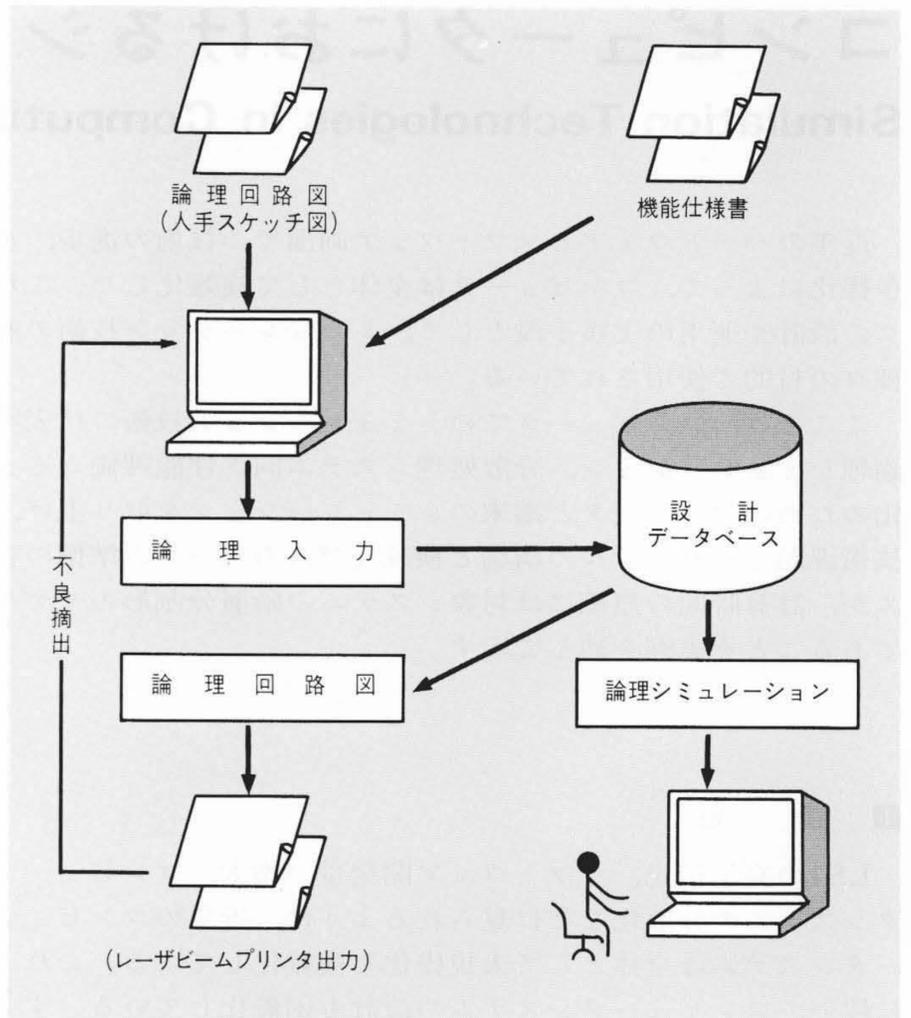


図1 論理設計支援システム 論理回路図作成及び論理シミュレーションの実行をTSS(タイムシェアリングシステム)端末(T-560/20)とレーザービームプリンタ(H-8196)との組合せで会話的に行なう。

きシステムによりレーザービームプリンタで即時自動描画される。すなわち、最新の論理回路図が設計データベース上に常に保存されている。次に、この論理回路図情報に基づいて論理シミュレーションを行ない、結果をTSS端末で確認する。論理不良により、期待どおり動作していなければ、設計データベース上の論理回路図情報を修正し、再び論理シミュレーションを行なう。

このように、論理シミュレーションは設計者とコンピュータとの間で会話的に進められるが、この作業サイクルの短縮が設計期間の短縮につながる。論理シミュレーションプログラムの高速化だけでなく、運用にも種々の工夫が必要になる。

3.3 論理シミュレーションの方法^{8)~10)}

図2に論理シミュレーションシステムの構成を示す。論理シミュレーションには、論理回路図情報のほかに、論理回路を動作させ検証するためのテストデータが必要になる。このシステムは、75万ゲート規模までの論理装置を扱えるが、シミュレーション時間は実機に比べて $10^5 \sim 10^7$ 倍はかかる。そこで、効率的なシミュレーションを行なうには、テストデータの選択と階層的な検証手順が必須になる。以下に、LSIを多用するコンピュータの論理シミュレーション手順と、それを支えるシステム機能について述べる。

(1) LSI単体シミュレーション

コンピュータの論理シミュレーションは、まずLSI単位にその機能を確認することから始める。LSI単体シミュレーションは、比較的論理規模が小さく処理時間も短いので、この段階で徹底的なテストを行なうことが重要である。そこで、テストデータの作成と結果の確認を容易にするため、ベクトル形のテストデータからタイムチャート形のテストデータに変換してLSI入力端子に与えたり、LSI出力端子に現われた

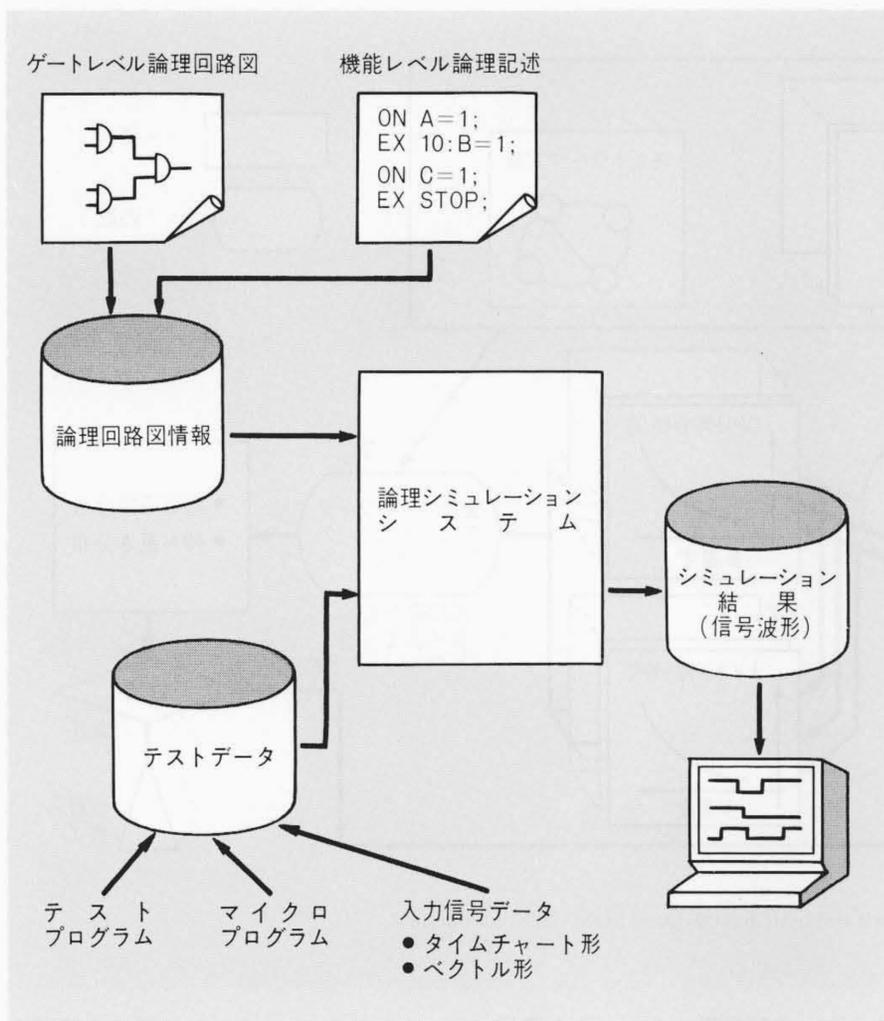


図2 論理シミュレーションシステムの構成 論理回路図情報とテストデータを用いて、論理シミュレーションが行なわれ、結果がTSS端末で参照できる。

信号波形をサンプリングして、期待値と比較するなどの機能をもつ機能レベル論理記述言語が利用される。

(2) ユニットシミュレーション

次に、コンピュータを構成する論理ユニット単位の機能確認に進む。この段階では、テストデータとして、例えばマイクロプログラムの基本命令が用いられる。シミュレーションを効果的に進めるため、関係する論理ユニットが機能レベル記述言語で表現され、同時にシミュレーションされることもある。

(3) 装置シミュレーション

最後に、コンピュータ全体をテスト用汎用プログラムを用いて確認する。このテスト用汎用プログラムは、実機に対してもそのまま使用されるもので、実行結果の良否を自動判定する。

実行結果に誤りがあれば、たとえLSI内の信号でもTSS端末に波形を表示させることができるので、容易に誤りの原因を追跡できる。

3.4 論理シミュレーションの適用効果

HITAC M-280H, M-260H, M-240HなどのLSIコンピュータの開発では、論理シミュレーションの利用により全論理不良の90%以上を摘出することができたため、LSIの作り直しも極度に少なくでき、実機検査期間も従来に比べ半減できた。従来、LSIコンピュータの開発に必須といわれていたハードウェアシミュレーションに代わり、論理シミュレーションが実用になっている。

4 分散処理システム向き性能評価シミュレータISCP/A-D

4.1 背景

コンピュータシステムの性能の代表的な評価尺度として、スループットと応答時間がある。スループットとはシステムが

単位時間当たり、トランザクションやジョブ(すなわち処理単位)を何回処理できるかを指し、応答時間とは処理単位を処理するのに要する時間である。コンピュータシステムを設計する際、設計者はまずCPU(中央処理装置)、チャネル、ディスク、端末などの資源を何台使いどう接続するか(システム構成)、について数種の代替案を創出する。次に代替案の性能を予測し、目標を満たしているか否かを判定し、その他の制約条件及び尺度を評価して代替案を絞っていく。このようなシステム構成設計を支援するものに一連のツール群ISCP(Integrated Tools for System Configuration Planning)がある¹¹⁾。これは、性能や信頼性の予測モデルの構築、修正、性能計算及び結果の出力を会話的に容易に行なえるツール群で、二つのサブシステムISCP/A(ISCP/Analysis)とISCP/S(ISCP/Synthesis)から成っている。ISCP/Aは、評価対象とするコンピュータシステムの特性に定めた性能予測手法を用いて評価を行なう5個のツールから成り^{12)~15)}、ISCP/Sは、与えられた目標性能及び目標信頼性を満たす最も経済的なシステム構成案を自動作成する4個のツールから成っている¹⁶⁾。ここでは、ISCP/Aの中の分散処理システム向き性能評価シミュレータISCP/A-D(ISCP/A-Distributed Computing System Model)について述べる。

近年、ハードウェアのコストパフォーマンスが著しく向上し、複数のコンピュータでシステムを構成すること(分散処理システム構成)が可能になり、通信技術、ネットワーク技術も長足の進歩を遂げそれらを支援している。しかし、設計する立場からみればシステムはより複雑になり、その結果、性能予測も長時間を要し従来手法をそのまま踏襲したのでは、実際上不可能となる。ISCP/A-Dはこの問題点を解決するための性能予測ツールである。

4.2 ISCP/A-Dによる性能予測

ISCP/A-Dのもとの性能予測は、図3に示すように階層的に3段階に分けて行なう。第I段階(スタティックモデル)では、回線、CPU、その他システム内の全資源の利用率を計算する。その結果明らかに過負荷であれば、設計を修正し再びこの計算を行なう。第II段階(ノード別ダイナミックモデル)では、CPUと入出力装置から成るサブシステム(ノード)の各資源での待ち時間を、待ち行列ネットワークモデルなどを用いた数式計算で、ノード内の処理単位数(多重度)に応じて求めておく。第III段階(全体ネットワークシミュレーションモデル)では、第II段階で求めた計算結果を用いて、システム全体のシミュレーションを行なう。この階層分けにより、ノード内の煩雑な動きを逐一シミュレートすることなく性能予測ができ、予測に要する時間は全体のシミュレーションを行なう場合の数分の一に短縮される。シミュレートは回線、主メモリ、タスク(ノード内の資源を割り当てられる処理単位)の占有と解放、CPU、入出力装置などに要する時間経過を実際にプログラムで模擬しながら行ない、その途中で応答時間、その他の統計情報をやはりプログラムによりサンプリングしていく。

4.3 ISCP/A-Dの適用効果

次にISCP/A-Dの使用例を示す。ここで性能予測の対象システムは、6ノードから成るオンラインシステムで、計13種類のオンライントランザクションが、このシステムに入力される。ISCP/A-Dによる性能予測結果を図4に示す。これは横軸を6ノード内の特定のノードの最大タスク多重度(主メモリ容量に比例)にとり、縦軸を当該ノード内のCPUとタスク利用率とトランザクションの応答時間をとったものである。同図で最大タスク多重度が12以下では、タスク利用率が100

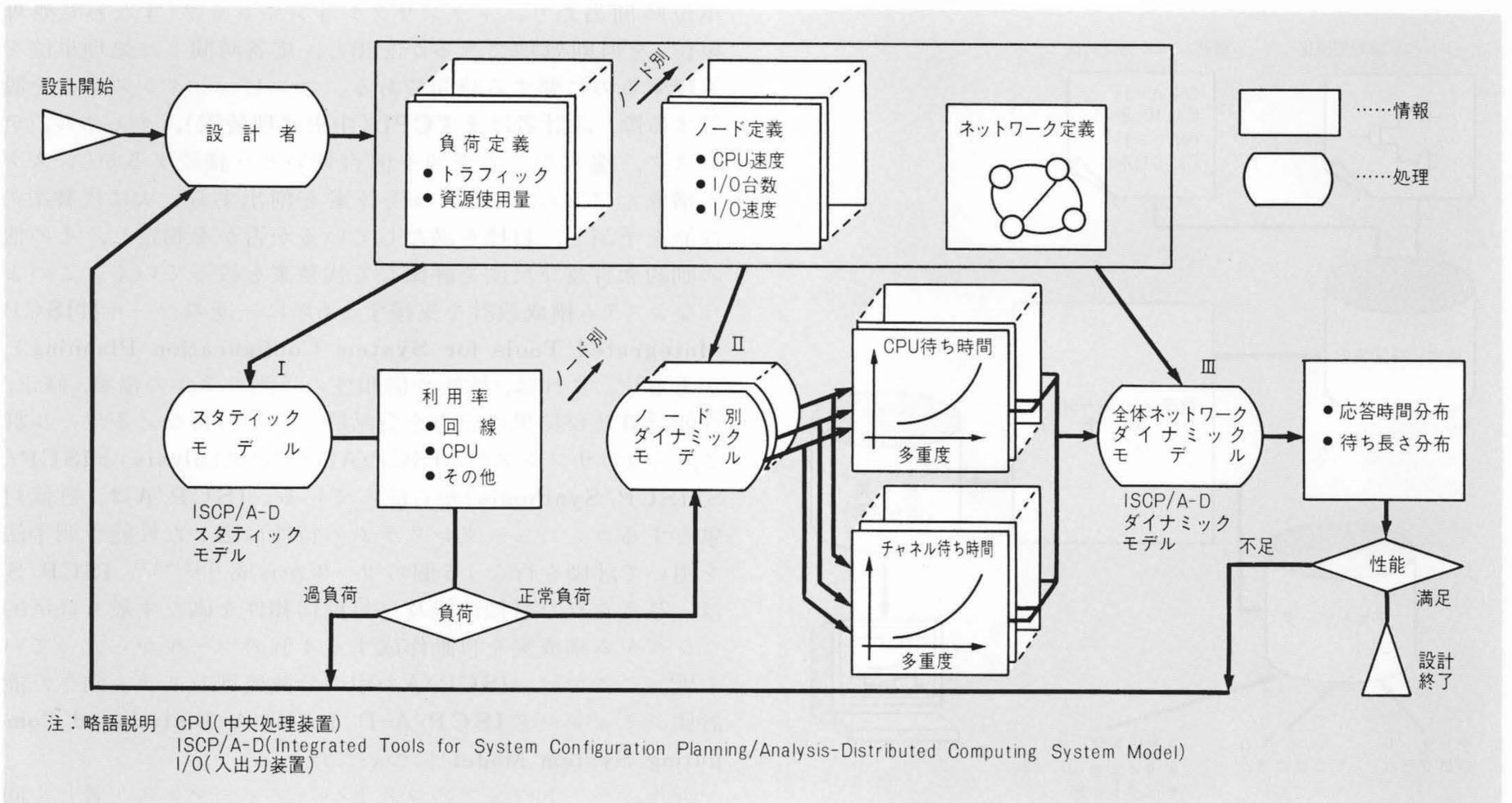


図3 ISCP/A-Dを用いた性能設計,性能予測 全体を3段階に分けることにより,中間結果のチェックを容易にし,またシミュレーションに要する時間を短縮している。

%であることから最大タスク多重度は12を超えるようにすべきこと,すなわち,それだけのタスクが収容できる主メモリの容量が必要なことが分かる。

ISCP/A-Dの技術的特徴は,評価対象システムを階層的に分割しモデル化して,予測を3段階に分け,数式計算とシミュレーションとを効果的に組み合わせた点にある。この結果,

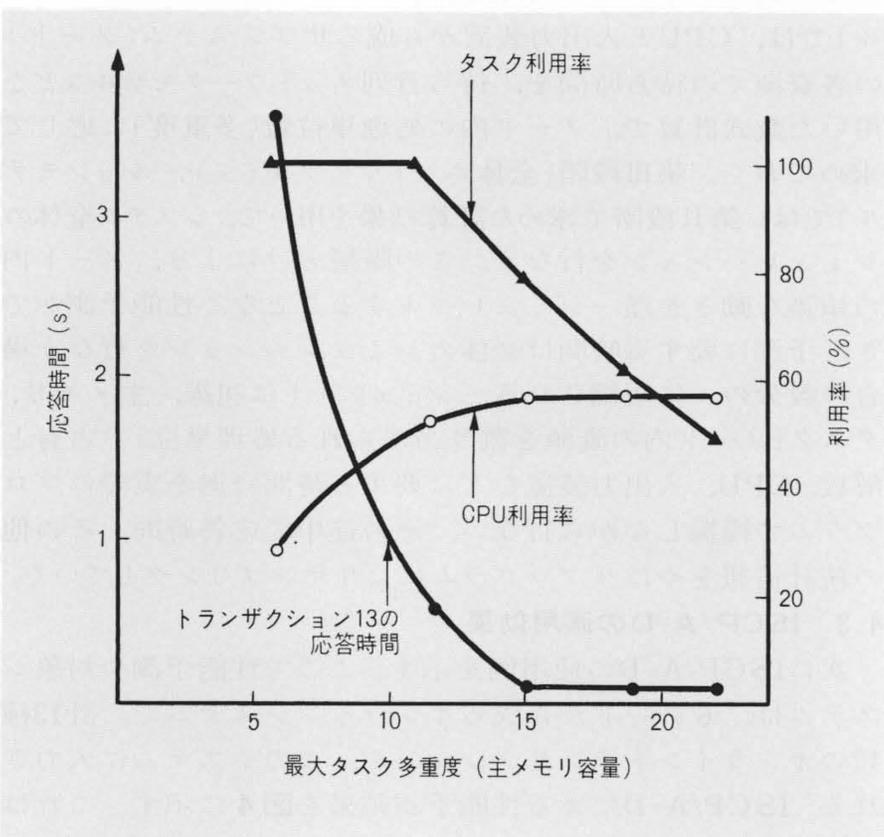


図4 ISCP/A-Dによる性能予測結果 6ノードから成るオンラインシステムのうち,特定のノードについて,応答時間とCPU,タスク利用率を評価した。横軸は最大タスク多重度であり,これを12以上にしないと応答時間が十分小さくならないことが分かる。

コンピュータシステムの設計者は,従来手法ではできなかった複雑な分散処理システムの性能予測を,短時間かつ多ケースについて行なえるようになった。

5 キーインアウトシミュレーションと多端末シミュレータ

5.1 背景

大規模TSSやオンラインシステムの進展は,そのシステムに含まれる端末やオペレータの増加を伴い,システム全体のテストや性能評価を困難にしている。また,コンピュータシステムの大型化やコンピュータ需要の増大は,オペレーション業務を複雑化している。コンピュータのオペレータや端末ユーザーは最も貴重なリソースであり,従来から各種の自動化技術が開発されてきたが,その基本となるものはオペレータ,端末ユーザーのシミュレーション技術である。ここでは,最近発展の著しいコンピュータの自動運転,省力化,無人化運転と,TSSやオンラインシステムの性能評価のためのオペレータや端末ユーザーのシミュレーション技術について述べる。

5.2 キーインアウトシミュレーション

キーインアウトシミュレーションは,プログラムによりコンピュータシステムのセンタオペレータの操作(コンソールのキーイン操作とキーアウト操作)のシミュレーションを行なうことをいう。汎用コンピュータシステムのコンソールのオペレータの機能は,(1)コンソール出力の受取り,(2)コンソール出力に基づく判断,(3)判断に基づくコンソールからのシステムへの応答及びコマンドの入力,から成る。(2)のなかで,複雑な判断機能を要する非定形オペレーションをシミュレーションによって代行することは困難であるが,他は次のシミュレーション機能によって代行することができる。

(a) キーインシミュレーション

プログラムの中からオペレータコマンドを投入できる機能

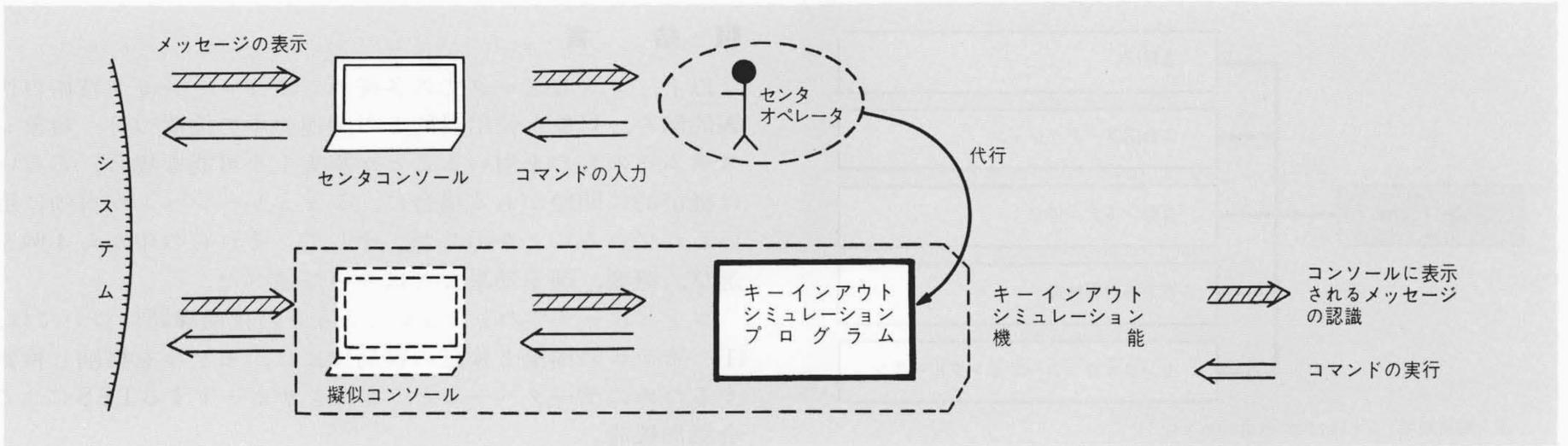


図5 キーインアウトシミュレーション機能の概要 センタオペレータがキーインアウトシミュレーション機能を用いたキーインアウトシミュレーションプログラムによって擬似される。

(b) キーアウトシミュレーション

プログラムの中で、コンソールに出力されるメッセージを入手できる機能

これら二つのシミュレーション機能の概要を図5に示す。同図で、センタコンソールは仮想のコンソール装置(擬似コンソール)により、また、センタオペレータはキーインアウトシミュレーションプログラムにより擬似され、システムと情報のやりとりを行なう。

5.3 多端末シミュレータCIOS

CIOS(Communication Input Output Simulation)は、プログラムによって、通信回線や端末装置や端末オペレータ(ユーザー)の動作をシミュレートする。このようなシミュレーション技術によりオンラインシステムのテストや性能評価が困難となる次のようなケースを回避することができる。

- (1) 実際の通信機器や回線が設置されていない。
- (2) 端末のオペレータが多数必要となる。
- (3) 端末の出力結果の確認に、複雑な手続きや手間に時間を要する。

CIOSは図6に示すように、回線・端末・端末オペレータをシミュレートする。その主な機能を次に述べる。

- (1) 端末単位、回線単位のシミュレーションができる。
- (2) タイミングの制御により時間に依存する端末、回線、端末オペレータの動作のシミュレーションができる。
- (3) ユーザー入出力ルーチンを用いて、HDLC (High-level Data Link Control)手順の回線の動作シミュレーションが

できる。

- (4) シミュレーションデータセットに、端末オペレータの動作シミュレーションのためのデータを記述可能である。

5.4 適用効果

コンソールや端末オペレータのソフトウェアによるシミュレーションの適用例の代表的なものにAOM(Auto Operation Monitor: 自動化モニタ)と、大規模TSSやオンラインシステムの性能評価が挙げられる。

(1) AOMへの適用

AOMは、HITAC Mシリーズ汎用コンピュータシステムのオペレーションの省力化や無人運転を可能にする自動運転システムであり、図7に示すような機能から成る。その中核となる自動応答・アクション機能及び自動システム停止機能は、コンソールオペレータのソフトウェアシミュレーションを行なうためのキーインアウトシミュレーション機能を用いて実現されている。

AOM導入により、次のような効果が期待できる。

(a) コンピュータ運用コストの削減

夜間無人運転と自動停止によるオペレータ、電力コストの削減

(b) 生産性向上

夜間、休日の自動運転による稼働時間の延長及び自動運転によるオペレーションミスの防止

(c) 労働条件の改善

自動、省力運転による労力の軽減及び労働時間帯の改善

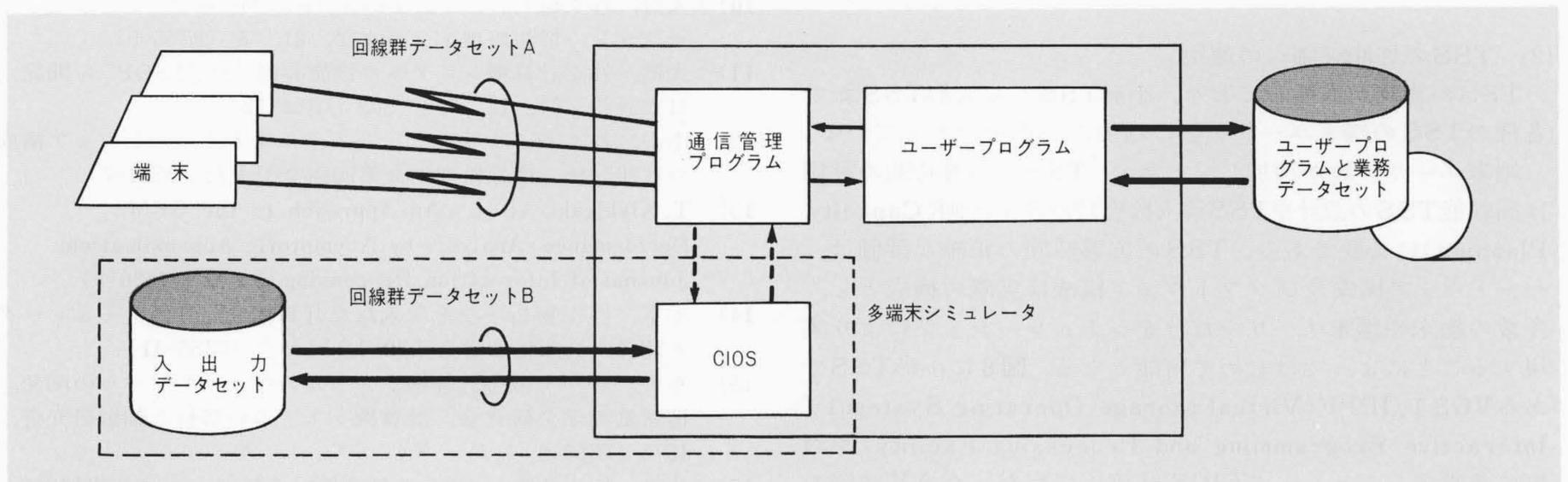


図6 CIOSの機能概要 回線・端末・端末ユーザーがCIOSによりシミュレートされる。

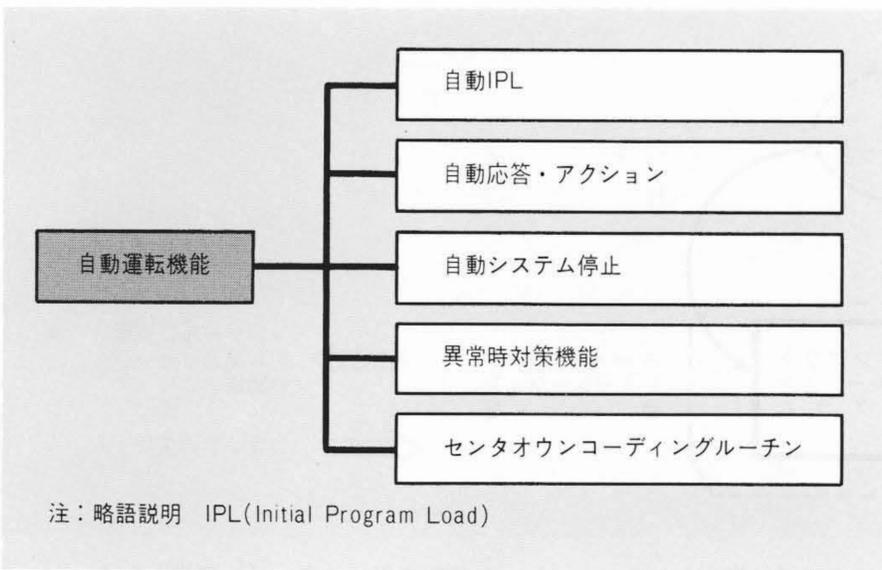


図7 自動化モニタAOMの機能構造 自動応答・アクション、自動システム停止のため、キーインアウトシミュレーション機能が用いられる。

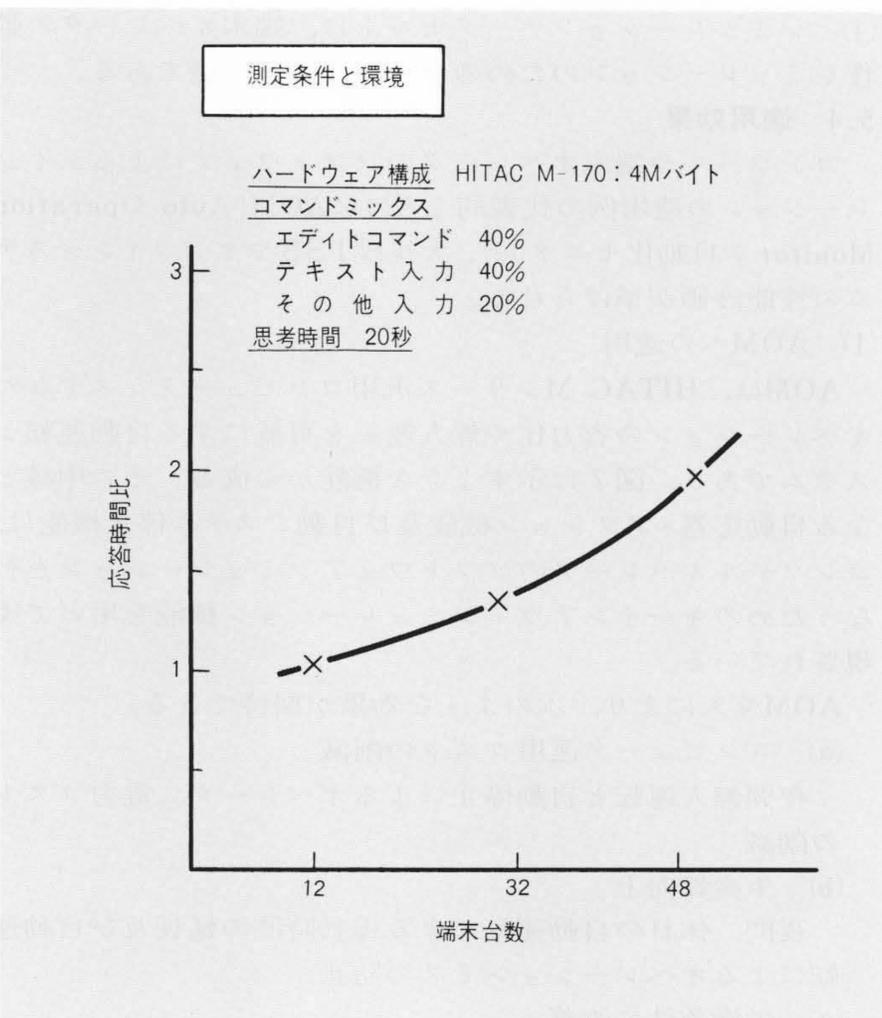


図8 VOS1/IPPFのTSS性能 多端末シミュレータCIOSを用いたVOS1/IPPFのTSS応答性能を示す。

(2) TSSの性能評価への適用

TSSの普及が進展しており、小形TSSから大形TSSまで各種のTSSの端末ユーザー数は増加の一途をたどっている。端末ユーザー数が増加したときの、TSSの応答時間の評価は高性能TSSの設計やTSS導入拡充時の容量計画(Capacity Planning)に必要である。TSSの応答時間の正確な評価は、ハードウェア構成及びソフトウェア構成は実際の構成とし、多数の端末や端末ユーザーだけをシミュレーションにより実現することによってはじめて可能となる。図8に小形TSSであるVOS1/IPPF(Virtual storage Operating System 1 / Interactive Programming and Processing Facility)を対象に多端末シミュレータCIOSを用いて行なった応答時間の評価データを示す。

6 結 言

以上、コンピュータでの各種のシミュレーション技術の代表的例を、対象と使用目的との関連の中で位置づけ、対象システムそのものを用いることが事実上不可能な場合、あるいは経済的に問題がある場合に、シミュレーションが有効に用いられていることを示した。そして、それらの中から4例を選び、概要、適用効果などについて述べた。

コンピュータでのシミュレーションの技術課題については、(1) モデルの構築と検証の容易化には、モデルを格納し検索するためのデータベースと、それをサポートするTSSによる会話形機能。

(2) 入力データの準備の容易化には、やはりデータベースと会話形機能。

(3) シミュレーションの実行に要する計算時間の短縮には、対象システムの階層分割形のモデル化、及びシミュレーションの数式計算の併用。

これらの機能がそれぞれ有効であることを実例を通して示した。これらの技術は、3章から5章にわたって述べたように、既に実用レベルに達している。しかし、コンピュータシステムの大規模化、複雑化に伴い、これらの技術課題に対する要求は、これからもよりいっそう厳しくなると予想される。今後ともシミュレーション技術の研究開発に努力していきたいと考える。

参考文献

- 1) 通信, 日立評論(日立技術の展望), 63, 1, 50 (昭56-1)
- 2) 保田, 外: 高信頼システムを実現するための専用システム“SST”, 日立評論, 61, 12, 895-898 (昭54-12)
- 3) 倉根, 外: 大容量記憶システム“MSS”の開発, 日立評論, 61, 12, 851-854 (昭54-12)
- 4) コンピュータ, 日立評論(日立技術の展望), 63, 1, 62 (昭56-1)
- 5) 中所, 外: 16ビットマイコン68000用クロステストデバッグ支援システムHITS, 情報処理学会, マイクロコンピュータ研究会, 20-3 (昭57-3)
- 6) 井村, 外: 仮想計算機システム“VMS”, 日立評論, 61, 12, 859-865 (昭54-12)
- 7) 大野, 外: 大形コンピュータの自動設計, 日立評論, 62, 7, 487-492 (昭55-7)
- 8) 三善, 外: 論理シミュレーションのための機能レベル, 論理記述言語, 情報処理学会第24回全国大会 (昭57-3)
- 9) Y. Ohno, et al.: Logic Verification System for Very Large Computers using LSI's, IEEE Proc. of 16th DA Conf. (1979-6)
- 10) 大野, 外: 超大形電子計算機HITAC M-200Hの論理シミュレーション, 情報処理学会論文誌, 21, 5 (昭55-9)
- 11) 大町, 外: 計算機システムの性能評価技法“ISCP”の開発, 日立評論, 61, 12, 899-902 (昭54-12)
- 12) 本山, 外: セントラルサーバモデルによるハードウェア構成の性能評価, 情報処理学会第20回全国大会 (昭54-7)
- 13) T. Nishigaki, et al.: An Approach to the GRM Performance Analysis by Asymptotic Approximation, Journal of Information Processing 3, 2 (1980-8)
- 14) 木下, 外: 解析手法を取入れた計算機性能評価シミュレータの開発, 情報処理学会第22回全国大会 (昭55-11)
- 15) 本山, 外: 分散型計算機システムの性能予測ツールの開発, 情報処理学会研究会, 計算機システムの解析と制御研究会, 13-3 (昭56-6)
- 16) 北嶋, 外: 分散システムの構成設計支援ツール—基本機能—, 情報処理学会第23回全国大会 (昭56-11)